

## МЕХАНИКА

УДК 699.844:004.94

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗВУКООСЛАБЛЕНИЯ  
ОКОННЫМ ОГРАЖДЕНИЕМ ПОМЕЩЕНИЯ*д-р техн. наук, проф. В.К. ЖЕЛЕЗНЯК, К.Я. РАХАНОВ*  
(Полоцкий государственный университет)

Представлен расчет утечки речевой информации через оконные ограждения. Построена математическая модель формирования параметров звукоослабления речевого сигнала, проходящего от источника звука через окно за пределы помещения. Для построения данной математической модели рассматривались три типа оконных ограждений: однослойное, двухслойное и трехслойное, для каждого из которых учитывались его основные характеристики. Предложенная математическая модель реализована в программе, которая позволяет анализировать звукоослабление речевого сигнала в зависимости от параметров отдельного окна и тем самым дает возможность не только определить канал утечки, но и найти способы его устранения. Разработанный программный компонент позволяет строить как графическое отображение звукоослабления для всех частот речевого сигнала, так и численное для третьоктавных полос.

**Введение.** Изоляция воздушного шума помещения является важнейшей его характеристикой с точки зрения защиты от утечки речевой информации. Из всех элементов ограждающих конструкций окна наиболее уязвимы к звукоослаблению. Повышение звукоизоляции воздушного шума окнами достигается наряду с другими способами увеличением толщины стекол и увеличением воздушного промежутка между ними [1]. В последнее время используются конструкции, в которых давление в воздушном промежутке между стеклами снижено, в результате чего ослабление воздушного шума увеличивается.

Целью работы является оптимизация характеристик звукоослабления формированием параметров ограждающей конструкции окна. Это достигается с помощью предложенной математической модели. Данная модель представляет собой систему математических соотношений, отражающую важнейшие свойства формирования характеристик звукового сигнала, прошедшего за пределы помещения через оконное ограждение. Кроме определения математической модели разработан программный компонент, который позволяет динамически не только рассчитывать звукоослабление ограждения, но и графически его отображать, предоставляя более наглядное визуальное воспроизведение. Модель позволяет рассчитать суммарный уровень звука  $L$  в полосе речевых частот от 100 до 10000 Гц на трассе распространения акустической волны от источника звука к приемному устройству, которое расположено за пределами помещения. Данный расчет звукоослабления будет верным применительно не только к окнам, которые представляют собой одну створку, но и к окнам с несколькими створками. В таких окнах необходимо производить расчет каждой створки в отдельности и определять самую «ненадежную» из них. Ослабление для одной створки окна, дБ, [2]:

$$L = B_s - R + 10 \cdot \lg S_{\Pi}, \quad (1)$$

где  $B_s$  – типичный речевой сигнал с уровнями:  $B_s = 64$  дБ (тихая речь);  $B_s = 70$  дБ (речь со средним уровнем);  $B_s = 76$  дБ (громкая речь);  $B_s = 84$  дБ (речь, усиленная техническими средствами);  $R$  – ослабление звукового сигнала, прошедшего через глухое плоское ограждение, дБ;  $S_{\Pi}$  – площадь окна, м<sup>2</sup>.

Ослабление звукового сигнала может рассчитываться как для октавных полос, так и для третьоктавных. В данном случае использованы третьоктавные полосы, из-за большей точности. Описание самих характеристик речевого сигнала в третьоктавных полосах представлено в [3]. Ослабление рассчитывается в зависимости от материала, из которого состоит ограждение окна, толщины ограждения  $h$ , поверхностной плотности  $m$ , размера воздушного промежутка  $D$  при многослойном ограждении [4].

Используя [1], выведем формулы, которые применим при разработке программы. Математическая модель расчета частотной характеристики изоляции воздушного шума однослойным окном имеет вид:

$$R(f) = \begin{cases} \frac{(R_B - \eta) \cdot f_B - R_B \cdot f_{Nb-1} + f \cdot \eta}{f_B - f_{Nb-1}}, & f \in (0; f_B]; \\ \frac{R_B \cdot f_C - R_C \cdot f_B + f(R_C - R_B)}{f_C - f_B}, & f \in (f_B; f_C]; \\ \frac{R_C \cdot f_{Nc+1} - (R_C + \mu) \cdot f_C + f \cdot \mu}{f_{Nc+1} - f_C}, & f \in (f_C; \infty), \end{cases} \quad (2)$$

где  $\eta$  – увеличение ослабления материала на каждую третьоктаву при условии  $f \in (0; f_B]$ , дБ;  $\mu$  – увеличение ослабления материала на каждую третьоктаву при условии  $f \in (f_C; \infty)$ , дБ;  $f_{Nb-1}$  – средняя частота третьоктавы, которая находится перед третьоктавой, содержащей частоту  $f_B$ ;  $f_{Nc+1}$  – средняя частота третьоктавы, которая находится после третьоктавы, содержащей частоту  $f_C$ .

Результаты расчета по формуле (2) с помощью программы для однослойного окна представлены на рисунке 1.

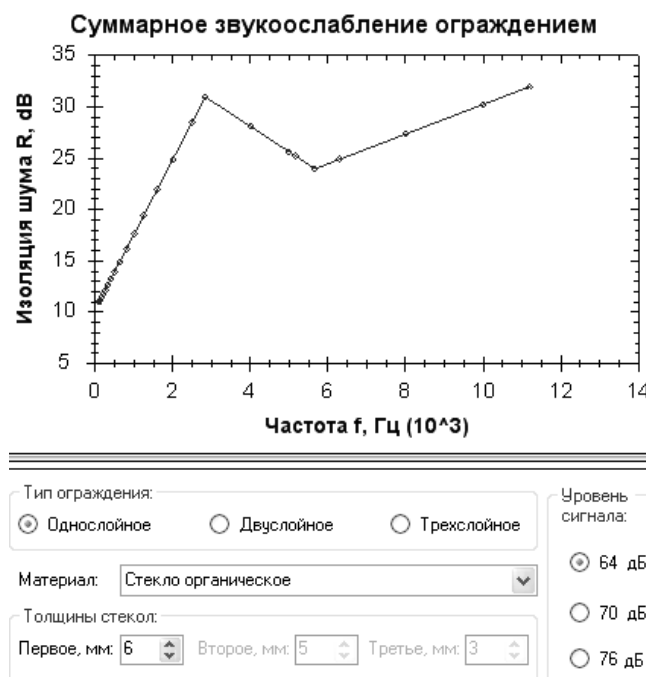


Рис. 1. Звукоослабление в случае однослойного окна

Математическая модель расчета частотной характеристики звукоослабления воздушного шума двойным окном при одинаковой толщине стекол будет иметь вид [2]:

$$R(f) = 5 + R_1(f) + R_2(f), \quad (3)$$

где  $R_1(f)$  – частотная характеристика звукоослабления воздушного шума однослойным плоским ограждением, дБ, рассчитанная согласно формуле (2);  $R_2(f)$  – повышение изоляции воздушного шума двойным глухим остеклением в зависимости от толщины воздушного промежутка, дБ, определяемая по формуле:

$$R_2(f) = \begin{cases} \frac{(-4) \cdot 8f_p - \sqrt{D/2} \cdot f_p + f \left( \sqrt{D/2} + 4 \right)}{7f_p}, & f \in (f_p; 8f_p], \\ \sqrt{D/2}, & f \in (8f_p; \infty), \end{cases} \quad (4)$$

где  $D$  – размер воздушного промежутка, м,  $D \in (10; 200)$ ;  $f_p$  – частота резонанса, Гц, определяемая по формуле [1]:

$$f_p = 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{D \cdot m_1 m_2}}, \quad (5)$$

где  $m_1, m_2$  – поверхностные плотности ограждений, кг·м<sup>-2</sup>.

Результаты расчета звукоизоляции по формуле (3) для двухслойного окна с одинаковыми толщинами стекол представлены на рисунке 2.

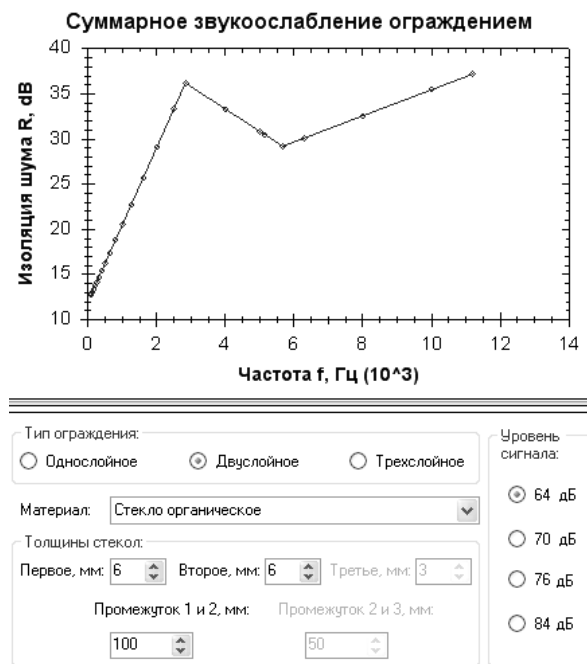


Рис. 2. Звукоослабление для двухслойного окна с одинаковыми толщинами стекол

Математическая модель расчета звукоослабления воздушного шума двойным окном при разной толщине стекол будет иметь вид:

$$R(f) = R'_1(f) + R_2(f) + R_3(f), \quad (6)$$

где  $R'_1(f)$  – частотная характеристика звукоослабления воздушного шума двойным остеклением при различной толщине ограждений, дБ, находится согласно формуле (7);  $R_2(f)$  – повышение звукоослабления воздушного шума двойным двухслойным окном в зависимости от толщины воздушного промежутка, дБ, определяемая по формуле (4);  $R_3(f)$  – добавочная величина звукоослабления, дБ, рассчитываемая по формуле (10):

$$R'_1(f) = \begin{cases} \frac{(R_B - \eta) \cdot f_B - R_B \cdot f_{Nb-1} + f \cdot \eta}{f_B - f_{Nb-1}}, & f \in (0; f_B]; \\ 35, & f \in (f_B; f_C]; \\ \frac{R_C \cdot f_{Nc+1} - (R_C + \mu) \cdot f_C + f \cdot \mu}{f_{Nc+1} - f_C}, & f \in (f_C; \infty), \end{cases} \quad (7)$$

где  $f_B$  и  $f_C$  следует определять по формулам [1]:

$$f_B = \frac{6000}{h_1}; \quad (8)$$

$$f_C = \frac{12000}{h_2}. \quad (9)$$

Здесь  $h_1$  и  $h_2$  – толщины ограждений, мм, при условии:  $h_1 > h_2$ .

$$R_3(f) = \begin{cases} 3, & \frac{h_2}{h_1} \in [0,4;0,5]; \\ 4, & \frac{h_2}{h_1} \in [0,6;0,8]. \end{cases} \quad (10)$$

Результаты расчета звукоизоляции по формуле (6) для двухслойного окна с различными толщинами стекол представлены на рисунке 3.

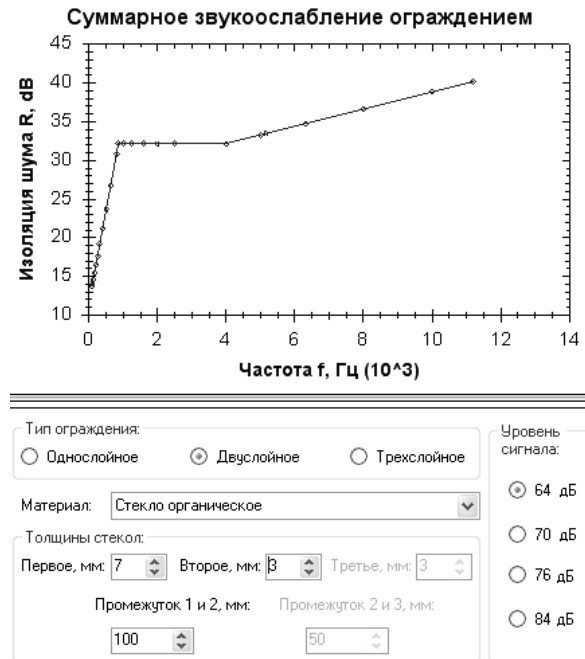


Рис. 3. Звукоослабление для двуслойного окна с различными толщинами стекол

Математическая модель расчета звукоослабления воздушного шума трехслойным окном будет иметь вид:

$$R(f) = R'(f) + R''(f), \quad (11)$$

где  $R'(f)$  – частотная характеристика звукоослабления воздушного шума первым и вторым слоями окна, дБ. Данная характеристика рассчитывается согласно формуле (6);  $R''(f)$  – частотная характеристика звукоослабления воздушного шума вторым и третьим слоем окна, дБ. Определять эту характеристику необходимо также по формуле (6), но с учетом того, что вычисляется она исходя из параметров второго и третьего слоя ограждения.

Результаты расчета звукоизоляции по формуле (11) для трехслойного окна с различными толщинами стекол представлены на рисунке 4.

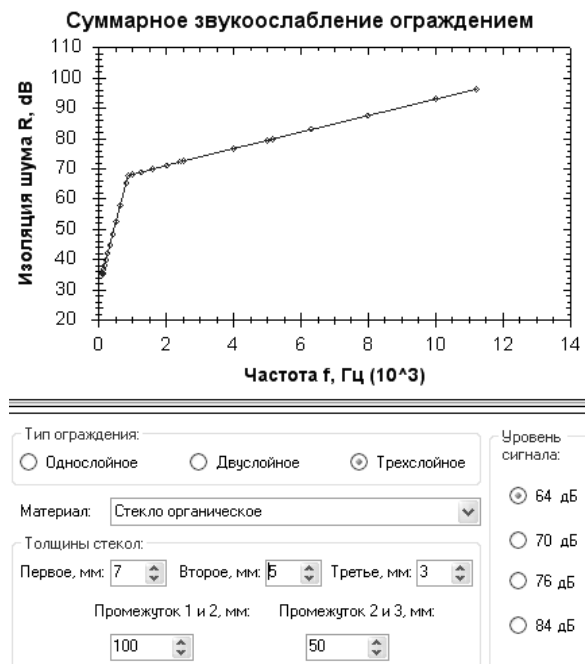


Рис. 4. Звукоослабление для трехслойного окна с различными толщинами стекол

Звукоослабление для одной створки окна зависит также от площади поверхности стекла согласно формуле (1).

Результаты расчетов звукоослаблений с учетом площади поверхности стекла представлены на рисунке 5.

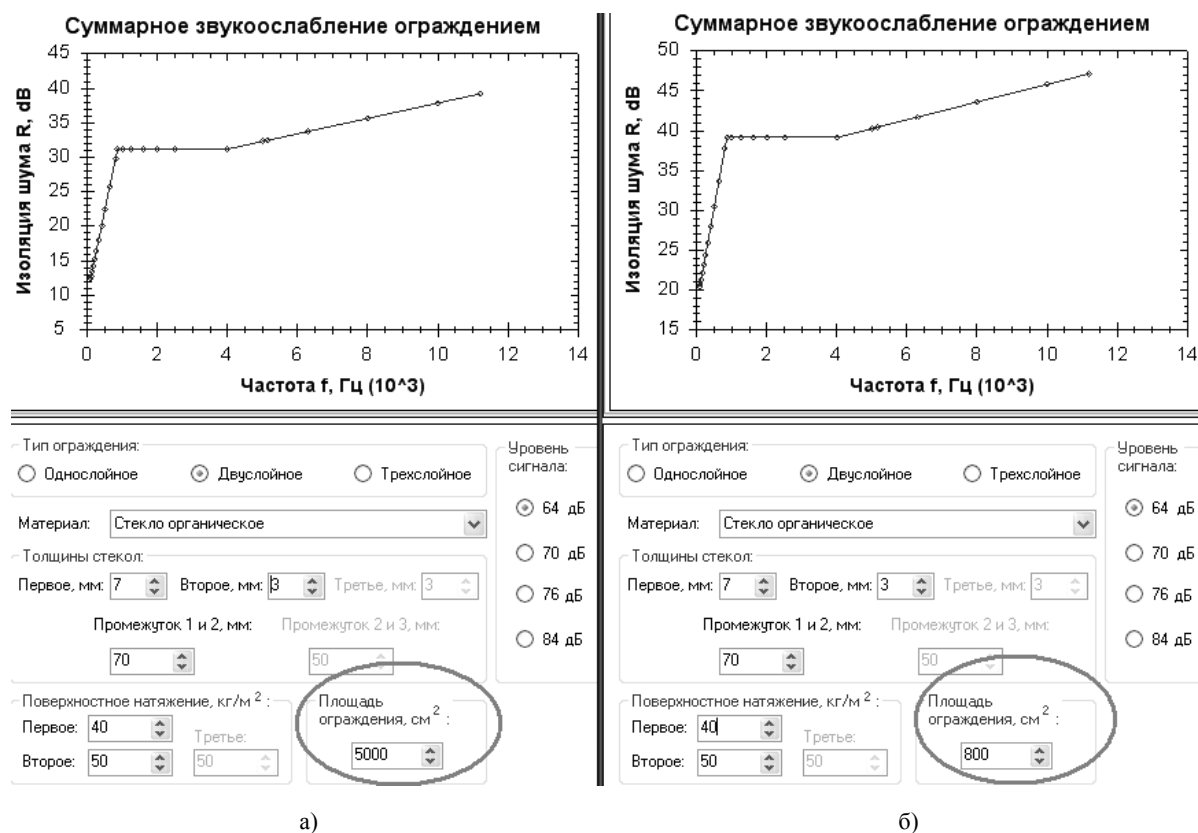


Рис. 5. Звукоослабление с учетом площади поверхности стекла:  
а – площадь ограждения 5000 см<sup>2</sup>; б – площадь ограждения 800 см<sup>2</sup>

**Вывод.** Варьирование толщиной однослойного ограждения не позволяет в необходимой степени снизить звукоизоляцию, а лишь дает возможность смещать резонансную частоту. Более эффективным способом повышения звукоизоляции и устранения минимума на графике является использование двухслойной ограждающей конструкции, под которой понимаем два жестких перекрытия с воздушной прослойкой между ними.

Двухслойное окно позволяет в большей степени добиться звукоизоляции не только за счет жесткого перекрытия, но и за счет воздушной прослойки между ними. При таком ограждении, где толщины стекол одинаковы либо их отношение больше 0,8, получаем увеличение звукоизоляции за счет воздушной прослойки, увеличивая которую повышаем ослабление звуковой волны. Но, как и в случае с однослойным ограждением, имеем минимум звукоизоляции на резонансной частоте. Чтобы окончательно избавиться от этого минимума, целесообразно использовать двухслойное ограждение с различными толщинами стекол. Отношение толщин должно лежать в промежутке от 0,4 до 0,8 [3].

Существуют случаи, когда с технической точки зрения создание двухслойных окон не всегда возможно из-за сложностей создания настолько большой воздушной прослойки, которая позволит ослабить звуковую волну до необходимого значения. И чтобы полностью избавиться от канала утечки, эффективно будет использовать трехслойную модель оконной конструкции. Такое окно представляет собой три жестких перекрытия с воздушными прослойками между ними.

В результате разработанный программный компонент, реализующий данную математическую модель, позволяет программно моделировать характеристики звукового сигнала, прошедшего за пределы помещения через глухое плоское окно. Он позволяет наглядно формировать как графическое, так и численное представление характеристик звукоослабления звукового сигнала. Программа позволяет проследить динамику изменения характеристик сигнала от параметров оконной конструкции. Общий вид программы представлен на рисунке 6.

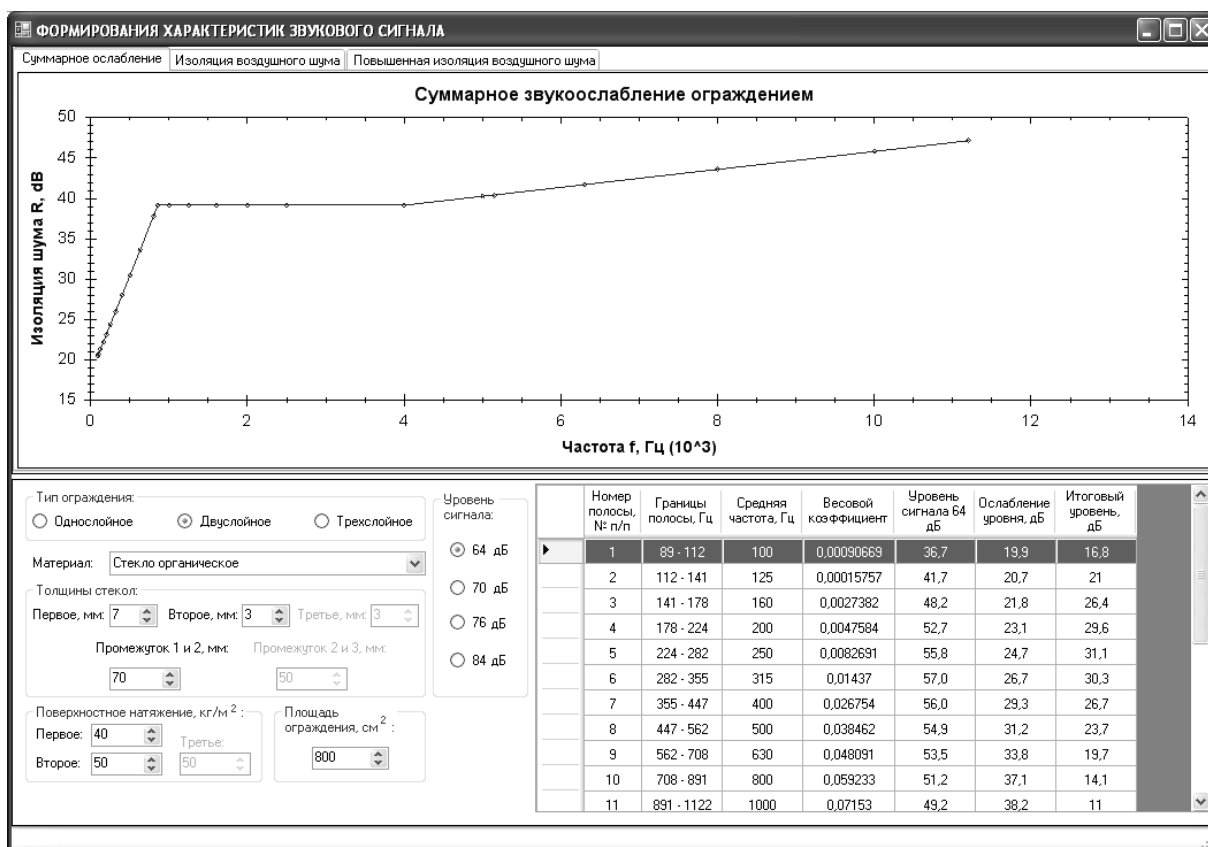


Рис. 6. Общий вид программы

## ЛИТЕРАТУРА

1. Защита от шума: СНиП П-12-77 / Госстрой России. – М.: ТУП ЦПП, 2002. – 52 с.
2. Борьба с шумом на производстве: справочник / Е.Я. Юдин [и др.]; под общ. ред. Е.Я. Юдина. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
3. Железняк В.К. Защита информации от утечки по техническим каналам: учеб. пособие / В.К. Железняк. – СПб.: ГУАП, 2006. – 188 с.
4. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Г.Л. Осипов [и др.]; под ред. Г.Л. Осипова, Е.Я. Юдина. – М.: Стройиздат, 1987. – 558 с.

Поступила 16.06.2008